

УДК 551.510.413.5+533.9.082.5

ФОТОМЕТРИЯ СВЕЧЕНИЯ ИОНОСФЕРЫ, СТИМУЛИРОВАННОГО МОЩНЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ СТЕНДА «СУРА»

А.М. Насыров, Р.И. Гумеров, И.А. Насыров

Аннотация

В статье описан оригинальный быстродействующий фотометр, построенный на принципе счета фотонов. Приведены некоторые экспериментальные результаты по регистрации искусственного свечения ионосферы в зеленой линии оптического спектра, стимулированного мощным радиоизлучением стенда «Сура».

Ключевые слова: ионосфера, фотометрия протяженных слабосветящихся объектов.

Введение

Изучение физических явлений в плазме методом воздействия мощными радиоволнами на ионосферу ведется уже около сорока лет. Антенная система исследовательских станций воздействия на ионосферу (нагревных стендов) строится таким образом, чтобы радиоизлучение было сфокусировано в вертикальном направлении. Сейчас в мире имеется пять действующих установок: одна в России («Сура» в Васильурске, НИРФИ), две в Европе («Tromsø» в Северной Норвегии и SPEAR на о-ве Шпицбергене), две в США (HAARP и HIPAS на Аляске)¹.

Наиболее интенсивные нелинейные эффекты взаимодействия мощной радиоволны с ионосферной плазмой наблюдаются на высотах 200–300 км в F -слое ионосферы. Это является следствием совпадения частоты мощной возбуждающей волны с частотами собственных колебаний плазмы. В результате в области резонанса происходит возбуждение собственных колебаний плазмы, развивается плазменная турбулентность, что и служит причиной заметного нагрева электронов, их ускорения вплоть до энергий порядка 30 эВ, структуризации плазмы, генерации искусственного радиоизлучения и ряда других физических явлений [1, 2].

Диагностика возмущенной области ионосферы осуществляется с помощью радиозондирования и просвечивания возмущенной области ионосферы пробными радиоволнами различных диапазонов (КВ, УКВ, СВЧ), а также при измерениях излучения возмущенной области в оптическом и радиодиапазонах [3–10]. Наблюдения искусственного оптического свечения используются для изучения характеристик ускорения электронов, а также для картографирования ионосферных возмущений, в частности перемещения плазменных неоднородностей [11].

Изучение нелинейных явлений в ионосферной плазме продолжается. Ряд обнаруженных экспериментальных эффектов (развитие искусственного радиоизлучения ионосферы, «пиковый режим» поглощения мощных радиоволн, практически полное поглощение мощной радиоволны O -поляризации на этапе развития стикционной неустойчивости (см. рис. 1), механизм ускорения электронов и др.) не нашел ясного теоретического обоснования.

¹Названия «Сура» и «Tromsø» даны по месту расположения нагревных стендов. HAARP – High frequency Active Auroral Research Program; HIPAS – High Power Auroral Simulations; SPEAR – Space Plasma Exploration by Active Radar.

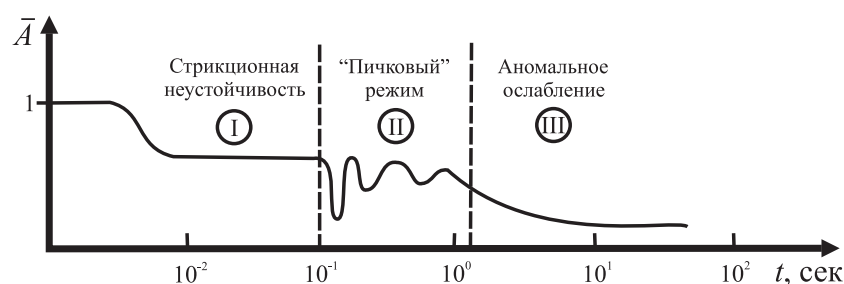


Рис. 1. Уменьшение интенсивности мощной декаметровый радиоволны O -поляризации, отраженной от ионосферы [12]

В частности, нет полного понимания физических механизмов ускорения электронов на начальном этапе воздействия мощным радиоизлучением на ионосферу (режимы I и II на рис. 1). Это связано с небольшим объемом проведенных экспериментов, в особенности при малых временах воздействия на ионосферу, когда тепловые механизмы развития нелинейных явлений (режим III на рис. 1) еще отсутствуют.

Информативным методом является измерение искусственной модуляции свечения ночного неба при модификации ионосферы мощными радиоволнами. Экспериментально установлено, что при воздействии на ионосферу мощными радиоволнами изменяется интенсивность свечения на красной (630 нм , $O(^1D)$) и зеленой (557.7 нм , $O(^1S)$) линиях свечения атомарного кислорода. Красная линия – особая, ибо у нее очень низкий минимальный уровень возбуждения электронным ударом (1.96 эВ). Излучение в этой линии – переход $^1D_2 \rightarrow ^3P_2$ – имеет большое время задержки: $\tau = 130\text{ с}$ [13]. Поэтому существенное значение приобретает процесс гашения возбужденного атома за счет его столкновения с другими молекулами и атомами ионосферы. Отсюда следует, что интенсивность излучения красной линии существенно зависит от высоты. В частности, на высотах F -слоя ($\sim 300\text{ км}$) гашение не является сильным, а в E -слое ($\sim 110 \div 130\text{ км}$) гашение практически подавляет красную линию излучения.

Зеленая линия имеет более высокий минимальный потенциал возбуждения (4.17 эВ), зато высвечивается с очень малой задержкой ($\tau = 0.7\text{ с}$) [13]. Так что свечение зеленой линии определяется только ее возбуждением ударами электронов.

Кроме этого, обнаружено свечение на линиях 844.6 нм (переход $O(3p^3P) \rightarrow O(3s^3S)$, энергия возбуждения 10.99 эВ) и 427.8 нм (переход из состояния $N_2^+(B^2\Sigma_u^+)$ на первый вибрационный уровень основного электронного состояния иона молекулярного азота $N_2^+(X^2\Sigma_u^+)$) с временем жизни порядка нескольких мкс [13].

Для исследования связи функции распределения электронов по энергиям возбуждения с высокочастотной плазменной турбулентностью на начальном этапе взаимодействия мощной радиоволны с ионосферной плазмой необходимо выполнить измерения в зеленой и синей линиях оптического спектра с высоким временным разрешением, сопоставимым с временем жизни возбужденных состояний атомов кислорода и ионов азота.

Данная постановка экспериментальных исследований требует развития методов фотометрии слабосветящихся протяженных объектов, имеющих короткие времена жизни от нескольких мкс (линия 427.8 нм) до $\sim 1\text{ с}$ (линия 557.7 нм). Изменение уровня свечения возмущенной области ионосферы отличается от фонового уровня на несколько процентов ($\sim 3 \div 10\%$).

В настоящей статье дается описание оригинального быстродействующего фотометра, построенного на принципе счета фотонов. Этот фотометр входит в состав мобильного фотометрического комплекса Казанского университета (МФК), разработанного авторами. Приводятся также некоторые экспериментальные результаты по регистрации стимулированного свечения ионосферы (ССИ) в зеленой линии оптического спектра, полученные на радиополигоне «Васильсурск» при воздействии на ионосферу мощным радиоизлучением стенда «Сура».

1. Описание фотометра

В связи с особенностями эксперимента фотометр должен удовлетворять следующим основным требованиям: регистрировать пороговые световые потоки в линиях азота и атомарного кислорода; иметь возможность изменять период накопления сигнала в широком диапазоне времен (от 10^{-3} до 10^2 с); иметь точную временную привязку момента выборки сигнала к шкале всемирного времени (UTC). Кроме того, электронная аппаратура фотометра должна сохранять работоспособность в температурном диапазоне от -30°C до $+30^\circ\text{C}$ и относительной влажности до 90%. Сильные радиочастотные наводки стенда «Сура» не должны влиять на качество измерений и работоспособность аппаратуры.

Требования к консоли (пульту управления) – максимальное удобство для визуального контроля, архивирования и экспресс-обработки данных в процессе измерений. Кроме этого фотометр должен быть пригоден для астрономических наблюдений, в частности, для наблюдения покрытий звезд астероидами. Такие наблюдения дают уникальную информацию о форме, кратности и эфемеридах малых тел солнечной системы.

С учетом требований, предъявляемых к фотометру, были определены следующие принципы его разработки.

- В качестве питающей оптики предпочтительно (с точки зрения мобильности) использование серийных полупрофессиональных телескопов (например, телескопов MEADE с апертурой до 400 мм и интерференционными фильтрами на соответствующие длины волн).

- Приемник оптического излучения должен быть быстрым для регистрации коротких световых вспышек, иметь пороговую чувствительность и способность регистрировать отдельные фотоны, обладать подходящей спектральной характеристикой и обеспечивать хорошее сопряжение с оптикой телескопа. Для этой цели лучше всего подходят фотоэлектронные умножители (ФЭУ).

- Цифровая часть фотометра, его аппаратура управления должна быть реализована по двухуровневому принципу: та, что работает в режиме реального времени, выполняется на базе микроконтроллера (МК) ARM; консоль и интерфейсы – на основе персонального компьютера (ПК) под управлением операционной системы (ОС) Windows. Связь МК с ПК осуществляется по стандартному сетевому протоколу.

- Точная временная привязка должна быть реализована на основе GPS-синхрометра, его связь устанавливается с ПК по интерфейсу RS-485.

Блок-схема фотометра, разработанного в соответствии с этими принципами, приведена на рис. 2. Подсчет импульсов ФЭУ производится с периодами выборки, кратными миллисекунде и задаваемыми программно. Выборки привязаны к шкале всемирного времени UTC с точностью ~ 1 мкс. Привязка осуществляется при помощи импульсов 1 PPS и опорной частоты 10 МГц GPS-приемника. Импульсы 1 PPS поступают на вход порта общего назначения МК (ATMEL, AT91SAM7X), а опорная частота на вход таймера-счетчика (TC2) контроллера.

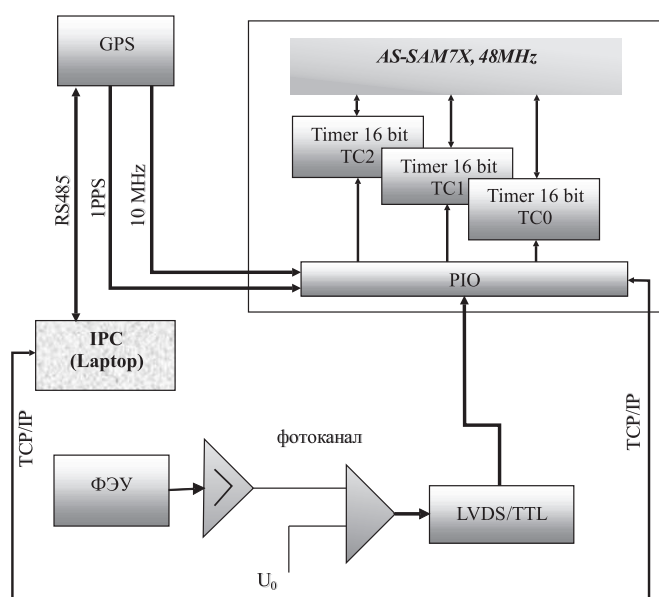


Рис. 2. Блок-схема аппаратуры фотометра

На выходе TC2 формируются импульсы с периодом 1 мс, инициирующие аппаратные прерывания и задающие минимальный квант времени для формирования интервала выборки (периода времени накопления сигнала ФЭУ). Так как работа TC2 управляется сигналами 1 PPS, то тем самым осуществляется синхронизация отсчетов фотометра со шкалой UTC.

Подсчет фотонов производится двумя счетчиками TC0 и TC1, работающими поочередно: пока один счетчик считает, информация с другого поступает в регистры процессора, и, таким образом, исключается погрешность, связанная с конечным временем опроса счетчиков, которая при малых интервалах выборки может накопиться до существенной величины.

Передача данных от МК к ПК (IPC на рис. 2) производится по витой паре с использованием стека протоколов TCP/IP. Для совместной работы МК и ПК на основе ОС Windows используется специально разработанное для этой цели программное обеспечение. Для передачи данных от МК к ПК используется четыре буфера. Когда один из них заполняется, управляющая программа МК начинает пересылку данных из этого буфера к ПК через сетевой интерфейс и одновременно с этим начинает заполнение следующего буфера. После завершения отправки данных, содержащихся в заполненном буфере, он снова отправляется в очередь пустых буферов. Работа микроконтроллера продолжается до получения команды остановки (завершение цикла фотометрирования, прерывание этого цикла оператором, переполнение счетчиков TC0 или TC1).

Основные функции консоли – настройка, запуск и остановка счетчика фотонов; сохранение результатов измерений в файлах на жестком магнитном диске ПК; обеспечение возможности визуального контроля процесса измерений в реальном времени с помощью графического окна.

Монтаж выносных элементов быстрого счетчика фотонов (микроконтроллера ARM7, источников питания и преобразователей интерфейсов) выполнен в заземленном металлическом корпусе, все кабели связи экранированы, что обеспечивает необходимую защиту от радиочастотных наводок, создаваемых стендом «Сура» и другими мощными передающими устройствами.



Рис. 3. Общий вид фотометра

Общий вид фотометра показан на рис. 3. Снимок сделан на радиополигоне «Васильсурск». В состав фотометра, кроме рассмотренного устройства, входят блок ФЭУ, выполненный на базе модуля усилителя-дискриминатора LA100AD («Обнинская фотоника», г. Обнинск) и ФЭУ-100; полупрофессиональный телескоп MEADE DeLuxe16 со световым диаметром 400 мм и фокусным расстоянием 1800 мм. Управление фотометром производится с консоли (промышленный компьютер IPC6806), которая может находиться на значительном (до 100 м) удалении от места расположения инструмента.

2. Методика проведения измерений

Эксперименты проводились на нагревном стенде «Сура» (радиополигон «Васильсурск», Нижегородская обл., 56.13° с.ш., 46.10° в.д.). Величина магнитного склонения для данного пункта составляет $\sim 10^\circ$ на восток от истинного направления на север. Эффективная излучаемая мощность стенда составляла 60–100 МВт. Режим работы стенда «Сура» был организован в виде 6-минутных циклов: 2 мин нагрев – 4 мин пауза или 3 мин нагрев – 3 мин пауза. В паузах излучались импульсы длительностью 25 мс с частотой 1 импульс в 2 с. Рабочая частота передатчиков f_p всегда выбиралась ниже критической частоты слоя $F2$ ионосферы (f_oF2). Воздействие на ионосферу осуществлялось мощной радиоволной обыкновенной поляризации (O -мода). В экспериментах использовались три вида ориентации диаграммы направленности антенны стенда: вертикальная (в зенит), с наклоном на 12° и на 16° от зенита на юг в плоскости магнитного меридиана.

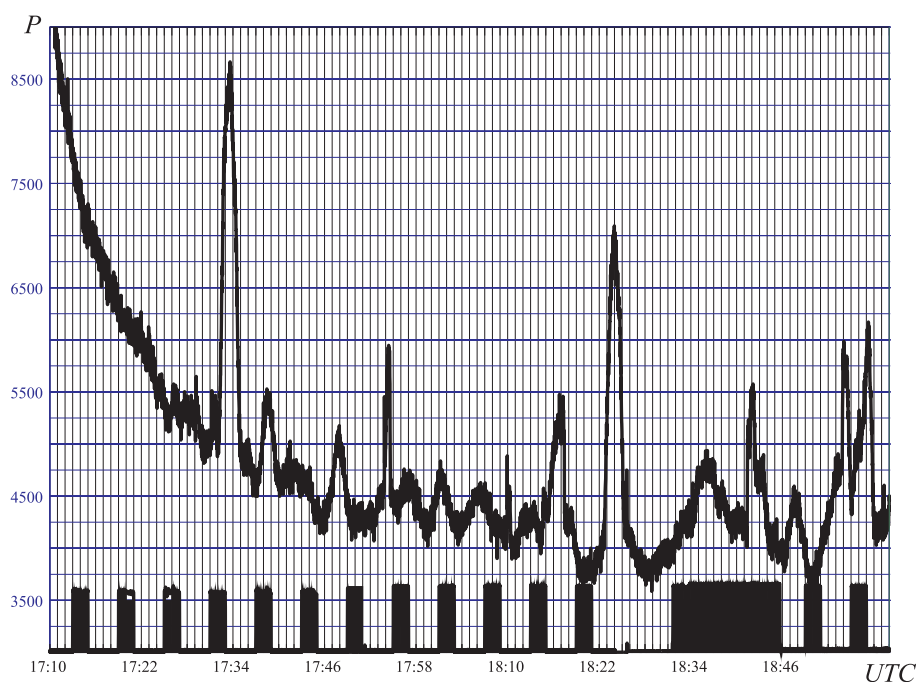


Рис. 4. Фотометрическая кривая, полученная 7 сентября 2010 г. в зеленой линии оптического спектра ($\lambda = 557.7$ нм). На временной оси показаны циклы включения стенда «Сура»

Измерения оптического свечения на длине волны $\lambda = 557.7$ нм проводились с помощью описанного в разд. 1 фотометра, оснащенного узкополосным интерференционным светофильтром. Время накопления сигнала на фотометре устанавливалось равным 20 мс. Оптический инструмент выставлялся соответственно в зенит или на 12° и 16° – 17° к югу от зенита в зависимости от программы эксперимента. Фотометрическая кривая, полученная 7 сентября 2010 г., показана на рис. 4. Здесь по оси абсцисс отложено Всемирное координированное время (UTC), по оси ординат – количество фотонов (P), зарегистрированных за время накопления сигнала (для графика, представленного на рис. 4, отсчеты, полученные в результате 20 мс накопления сигнала, суммировались по интервалам времени в 1 с).

По условиям проведения эксперимента 7 сентября 2010 г. диаграмма направленности антенной системы стенда «Сура» была наклонена на 12° от зенита на юг вдоль магнитного меридиана. Для регистрации искусственного свечения ионосферы, стимулированного мощным радиоизлучением стенда «Сура», питающая оптика фотометра была отклонена на 13° – 14° от зенита на юг в плоскости магнитного меридиана.

Синхронно с фотометрической регистрацией проводилась регистрация уровня радиосигнала, излучаемого передатчиками стенда «Сура». Для этой цели использовался радиоприемник ICOM IC-R75 в комплекте с аналогово-цифровым преобразователем L-Card E20-10, подключенный к промышленному компьютеру через USB-интерфейс.

Часы промышленного компьютера были привязаны к временной шкале UTC при помощи GPS-приемника Trimble Thunderbolt, входящего в состав фотометра.

3. Некоторые результаты предварительной обработки экспериментальных данных

На поведение фотометрической кривой, представленной на рис. 4, влияют одновременно несколько процессов. Во-первых, наблюдается экспоненциальное понижение общего фона свечения неба, связанное с заходом Солнца. Во-вторых, начиная с 17:30 UTC (когда небо уже достаточно темное) наблюдаются колоколообразные всплески, связанные с прохождением звезд через поле зрения фотометра. Это усугублялось тем, что 7 сентября 2010 г. по условиям проведения измерений питающая оптика фотометра была направлена в тот сектор ночного неба, в котором в данный период года и в это время суток проходит Млечный путь. Поэтому количество звезд, регистрируемых инструментом, достаточно велико. В-третьих, на указанные выше процессы накладывалось стимулированное свечение ионосферы, вызванное работой стенда «Сура». Здесь необходимо отметить, что прохождение звезд через поле зрения фотометра вызывает увеличение регистрируемого светового потока на сотни и даже тысячи Релей, а увеличение светового потока, связанное со стимулированным свечением ионосферы в зеленой линии оптического спектра ($\lambda = 557.7$ нм), при мощностях возмущающих передатчиков, использовавшихся в эксперименте, может составлять лишь несколько единиц Релей. Это означает, что при регистрации стимулированного свечения ионосферы реализуется низкое соотношение сигнал/шум (С/Ш), так как полезным сигналом является уровень стимулированного свечения, а к шуму добавляется переменный фон, вызванный прохождением звезд через поле зрения фотометра.

Таким образом, при дальнейшей обработке экспериментальных данных необходимо учесть несколько обстоятельств. Для ФЭУ полезный сигнал n_S , несущий информацию о световом источнике, определяется как $n_S = n - n_D$ (здесь n – полный сигнал, полученный с выхода ФЭУ; n_D – флуктуации темнового сигнала ФЭУ, вызванные термоэмиссией). Если измеряется световой поток от постоянного источника и условия измерений не изменяются, то сигналы n и n_D стационарны и их распределение практически всегда близко к распределению Пуассона.

Как было отмечено во введении, наиболее интересной является начальная фаза взаимодействия мощного радиоизлучения с ионосферной плазмой (режим стрикционной неустойчивости и «пичковый» режим на рис. 1). Для исследований стимулированного излучения в оптическом диапазоне длин волн использовался импульсный режим работы стенда «Сура», когда в паузах между длительными периодами нагрева излучались импульсы длительностью 25 мс с периодом повторения 2 с. В этом случае на сигнал с мощной низкочастотной составляющей, обусловленной прохождением звезд через поле зрения фотометра, наложен высокочастотный сигнал стимулированного мощной радиоволной слабого свечения ионосферы, который необходимо выделить.

Для первичной обработки экспериментальных данных были выбраны последние полторы минуты «паузы» на участке фотометрической кривой (на рис. 5 участок выделен вертикальными штриховыми линиями). Выбор обусловлен следующим обстоятельством: общий фон неба уже достаточно темный, но сигнал от прохождения звезд еще не регистрируется, так как в это время суток Млечный путь находится в стороне от поля зрения фотометра; рассматриваемый участок фотометрической кривой может быть описан линейной зависимостью, при этом можно считать, что измеряется световой поток от постоянного источника, и следовательно, распределение отдельных отсчетов носит пуассоновский характер; искусственное свечение ионосферы, стимулированное длительным нагревом (продолжительностью 2 мин), оказывает минимальное влияние на «короткие» процессы.

Дальнейшая обработка экспериментальных данных проводилась по следующему алгоритму. В первую очередь произведено увеличение соотношения С/Ш

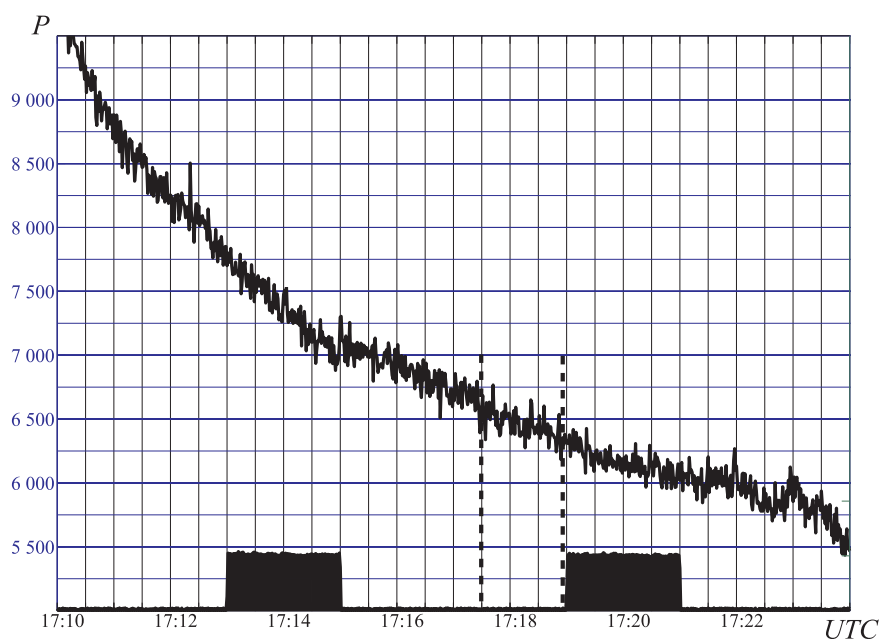


Рис. 5. Участок фотометрической кривой (с 17:17:30 до 17:19:00 UTC), выбранный для выделения высокочастотной составляющей регистрируемого светового потока

путем суммирования соседних отсчетов полученной фотометрической зависимости. Данная операция является правомерной, так как одно из базовых свойств распределения Пуассона состоит в том, что сумма независимых пуассоновских случайных величин также имеет распределение Пуассона. Известно, что для стационарных процессов соотношение $C/\text{Ш}$ растет пропорционально величине $\sqrt{\tau}$, где τ – время накопления сигнала. Суммирование проводилось по каждому пяти соседним отсчетам, таким образом время накопления сигнала было увеличено до 100 мс. Следовательно, соотношение $C/\text{Ш}$ увеличилось более чем в два раза. С другой стороны, известно (см., например, [13]), что генерация оптического излучения в зеленой линии спектра ($\lambda = 557.7$ нм) происходит при квантовом переходе атома кислорода уровня $O(^1S_0)$ на уровень $O(^1D_2)$ с характерным временем жизни ~ 0.7 с. Вновь полученные фотометрические отсчеты с дискретами по времени, равными 0.1 с, позволяют отследить динамику искусственного свечения ионосферы, стимулированного короткими (25 мс) импульсами накачки мощного радиоизлучения стенда «Сура».

Для новой фотометрической зависимости был найден параметр распределения Пуассона \bar{P}_δ (сплошная горизонтальная линия в верхней части рис. 6). Следует сказать, что если некоторая дискретная случайная величина Y имеет распределение Пуассона, то ее и математическое ожидание $M(Y)$, и дисперсия $D(Y)$ будут равны \bar{P}_δ .

Следующим шагом в обработке экспериментальных данных было деление выбранного полутораминутного интервала (с 17:17:30 до 17:19:00 UTC) на двухсекундные отрезки (по 20 отсчетов каждый) таким образом, чтобы в каждом из них был только один импульс накачки. Затем методом наложения эпох для каждого отсчета был найден параметр распределения Пуассона (\bar{P}_δ). Результаты представлены в верхней части рис. 6, вертикальными отрезками отмечен доверительный интервал в 95%. Для контроля правильности выбора интервалов «нарезки» фотометрической кривой запись работы стенда «Сура» за исследуемый промежуток

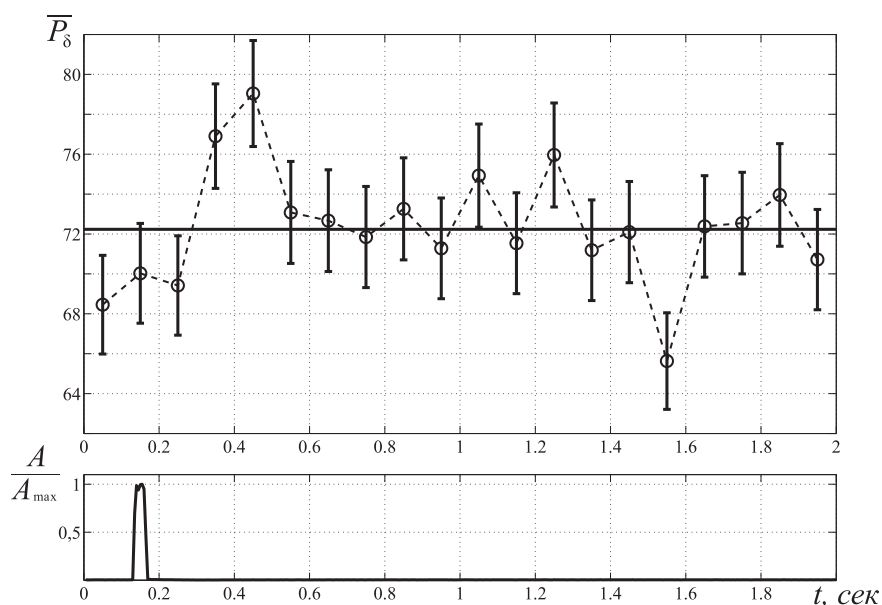


Рис. 6. Результаты измерений в зеленой линии оптического спектра ($\lambda = 557.7$ нм) при импульсной работе стенда «Сура», полученные методом наложения эпох: верхняя панель – фотометрические данные; нижняя панель – импульс «накачки» (25 мс)

времени разбивалась на те же двухсекундные интервалы. К получившимся отрезкам также был применен метод наложения эпох. Результат обработки записи импульсов накачки представлен в нормированном виде в нижней части рис. 6. На оси абсцисс рис. 6 отложен двухсекундный интервал времени, по которому проводилось интегрирование отсчетов (наложение эпох).

При режимах работы стенда «Сура», использовавшихся в сентябрьской серии экспериментов 2010 г., невозможно определить фоновый уровень свечения ночного неба без вклада стимулированного свечения ионосферы, так как не было предусмотрено «чистой» паузы и воздействие на ионосферу мощным радиоизлучением осуществлялось постоянно. Поэтому для оценки величины модуляции искусственного свечения ионосферы, стимулированного импульсами накачки, в качестве фонового уровня был выбран средний уровень всего полутораминутного интервала (горизонтальная линия в верхней части рис. 6).

Из рис. 6 видно, что после воздействия на ионосферу импульсом накачки уровень свечения ночного неба начинает расти и достигает своего максимума (+9% над фоном) через $\sim 0.3 \div 0.4$ с, затем примерно через $1.3 \div 1.4$ с он достигает своего минимума ($\sim -9\%$ от фонового уровня), после чего возвращается к среднему уровню свечения. Необходимо сказать, что полученный результат качественно хорошо согласуется с результатами, полученными в [5, 7, 9], и количественно совпадает с результатом, полученным в 2007 г. [10].

Заключение

С целью улучшения соотношения С/Ш при фотометрии слабосветящихся протяженных объектов с короткими временами жизни на базе микроконтроллера AT91SAM7X фирмы Atmel разработан фотометр. Он реализует точную временную привязку фотометрической кривой к мировой шкале времени (UTC) посредством приема GPS-сигналов при помощи приемника-синхрометра Thunderbolt.

Для обеспечения связи с компьютером в программе фотометра реализован датаграмный протокол UDP, входящий в семейство протоколов TCP/IP. Это позволяет осуществлять передачу фотометрических данных по сети Ethernet непосредственно с фотометра на управляющий компьютер (используется мобильный компьютер с ОС Windows). Разработан удобный интерфейс пользователя, позволяющий задавать режим и контролировать процесс регистрации в реальном масштабе времени, а также сохранять данные на жестком магнитном носителе ПК [14]. Настоящий фотометр входит в состав мобильного фотометрического комплекса, разработанного в Казанском университете.

Фотометр успешно прошел полевые испытания и используется для измерений оптического свечения ионосферы, стимулированного мощным радиоизлучением стенда «Сура». Во время проведения экспериментов в сентябре 2010 г. была зарегистрирована модуляция свечения ионосферы в зеленой линии оптического спектра ($\lambda = 557.7$ нм), стимулированная воздействием на ионосферу короткими (25 мс) импульсами волны накачки. Результаты качественно и количественно совпадают с полученными ранее, в том числе и при нашем участии.

Статья посвящается светлой памяти Альберта Махмутовича Насырова, безвременно ушедшего от нас 1 сентября 2011 года. За несколько дней до своей кончины он передал нам последние редакторские правки настоящей работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 09-02-01150а).

Summary

A.M. Nasyrov, R.I. Gumerov, I.A. Nasyrov. Photometric Measurements of Artificial Ionospheric Airglow Caused by Powerful Radioemission of "Sura" Facility.

An original photometric instrument based on the photon-counting mode is described in the paper. Some experimental results of photometric measurements of artificial airglow at 557.7 nm (green line) of ionosphere caused by "Sura" facility are presented.

Key words: ionosphere, photometric measurements of extended faint objects.

Литература

1. Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере // Усп. физ. наук. – 2007. – Т. 177, № 11. – С. 1145–1177.
2. Беликович В.В., Грач С.М. и др. Стенд «Сура»: исследования атмосферы и космического пространства // Изв. вузов. Радиофизика. – 2007. – Т. 50, № 7. – С. 545–576.
3. Thide B., Kopka B.H., Stubbe P. Observations of stimulated scattering of a strong high frequency radio wave in the ionosphere // Phys. Rev. Lett. – 1982. – V. 49 – P. 1561–1564.
4. Leyser T.B., Thide B., Waldenvik M., Goodman S., Frolov V.L., Grach S.M., Karashtin A.N., Komrakov G.P., Kotik D.S. Spectral structure of stimulated electromagnetic emissions between electron cyclotron harmonics // J. Geophys. Res. – 1993. – V. 98, No 10. – P. 17597–17606.
5. Гумеров Р.И., Капков В.Б., Комраков Г.П., Насыров А.М. Искусственное свечение ионосферы при кратковременном воздействии мощного радиоизлучения // Изв. вузов. Радиофизика. – 1999. – Т. 42, № 6. – С. 524–527.
6. Rietveld M.T., Kosch M.J., Blagoveshchenskaya N.F., Kornienko V.A., Leyser T.B., Yeoman T.K. Ionospheric electron heating, optical emissions, and striations induced

- by powerful HF radio waves at high latitudes: Aspect angle dependence // J. Geophys. Res. – 2003. – V. 108, No A4. – P. 1141-1–1141-16.
7. *Grach S.M., Nasyrov I.A., Gumerov R.I. et al.* Simultaneous observations of the 557.7 nm airglow and stimulated electromagnetic emission during HF pumping of the ionosphere with diagnostic schedule: First results // Adv. Space Res. – 2004. – V. 34. – P. 2422–2427.
 8. *Kosch M.J., Pedersen T., Hughes J., Marshall R., Gerken E., Senior A., Sentman D., McCarrick M., Djuth F.T.* Artificial optical emissions at HAARP for pump frequencies near the third and second electron gyro-harmonic // Ann. Geophys. – 2005. – V. 23, No 5. – P. 1585–1592.
 9. *Grach S.M., Sergeev E.N., Komrakov G.P., Kotov P.V., Nasyrov A.M., Nasyrov I.A., Gumerov R.I., Shaimukhametov R.R.* Studies of artificial airglow emission at 557.7 nm (green line) of upper atmosphere caused by “Sura” facility // SPIE Proc. – 2006. – V. 6522. – P. 652226-1–652226-8.
 10. *Насыров И.А., Грач С.М., Гумеров Р.И. и др.* Некоторые результаты измерений искусственного свечения ионосферы, стимулированного мощным радиоизлучением стенда «Сура», полученные в 2007–2009 гг. // Космическая радиолокация: Всерос. радиопиз. науч. чтения-конф. пам. Н.А. Арманды. Сб. докл. науч.-практ. конф. – Муром: Изд.-полиграф. центр МИ ВлГУ, 2010. – С. 210–215.
 11. *Grach S.M., Kosch M.J., Yashnov V.A., Sergeev E.N., Atroshenko M.A., Kotov P.V.* On the location and structure of the artificial 630-nm airglow patch over Sura facility // Ann. Geophys. – 2007. – V. 25, No 3. – P. 689–700.
 12. *Ерухимов Л.М., Метелёв С.А., Мясников Е.Н., Митяков Н.А., Фролов В.Л.* Искусственная ионосферная турбулентность (обзор) // Изв. вузов. Радиофизика. – 1987. – Т. 30, № 2. – С. 208–225.
 13. *Мак-Ивен М., Филлипс Л.* Химия атмосферы / Пер. с англ. – М.: Мир, 1978. – 376 с.
 14. *Артемов А.В., Гумеров Р.И., Насыров А.М., Насыров И.А.* Быстродействующий фотометр для регистрации искусственного свечения ионосферы, стимулированного антропогенными воздействиями // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Материалы XVI Междунар. симпозиума. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2009 – С. 560–562.

Поступила в редакцию
26.10.11

Насыров Альберт Махмутович – доктор физико-математических наук, профессор Казанского (Приволжского) федерального университета.

Гумеров Рустам Исакович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры радиоэлектроники Казанского (Приволжского) федерального университета.
E-mail: *rgumerov@ksu.ru*

Насыров Игорь Альбертович – кандидат физико-математических наук, доцент радиоэлектроники Казанского (Приволжского) федерального университета.
E-mail: *Igor.Nasyrov@ksu.ru*